

Моделирование зеркальной антенны с помощью HFSS ANSYS

Александр Курушин, Евгений Лаврецкий, Семён Дергачёв (Москва)

В статье описываются расчёты зеркальной антенны с помощью программы HFSS с использованием как базового метода конечных элементов, так и реализованных в HFSS v.15 методов интегральных уравнений и физической оптики. Реализация разнообразных методов в одной оболочке HFSS позволяет найти разумный компромисс между точностью и временем расчёта при решении разнообразных задач, а также выделить отдельные элементы структуры и рассчитать определённым образом их характеристики, а затем применить гибридизацию. Такой гибридный метод значительно расширяет возможности программы HFSS фирмы ANSYS.

Широко распространённые в настоящее время в спутниковой связи радиоастрономии зеркальные антенны имеют размеры от десятков сантиметров до сотен метров [1]. Это означает, что размеры антенн могут составлять сотни длин волн и более. Расчёт таких больших структур строгими электродинамическими методами потребовал бы больших вычислительных затрат. Для анализа и расчёта характеристик излучения зеркальных антенн большого электрического размера существуют приближённые методы, к которым относятся методы геометрической оптики и геометрической теории дифракции, а также методы физической оптики и физической теории дифракции [2–4].

В настоящее время наибольшую популярность, высокую эффективность и точность приобрёл метод физической оптики, дающий аппроксимацию поверхностного электрического тока для идеально-проводящих рассеивателей (рефлекторов). Метод физической оптики использует в качестве ключевого алгоритма численного расчёта следующую формулу:

$$\vec{J}^s = 2[\vec{H}, \vec{n}], \quad (1)$$

где \vec{n} – вектор нормали для каждой точки поверхности рефлектора, \vec{H} – вектор магнитного поля, создаваемого в данной точке первичным облучателем (А/м), \vec{J}^s – поверхностный электрический ток на металлическом реф-

лекторе (А/м). Далее, по известному электрическому току (1) находится поле излучения зеркальной антенны (вторичное поле). Расчёт вторичного поля сводится при этом к вычислению соответствующих двумерных интегралов Фурье от поверхностного электрического тока.

Алгоритм реализации в программе HFSS [4] метода физической оптики заключается в том, что от каждого элементарного тока излучения по направлению к каждой элементарной площадке металлического зеркала находится вектор магнитного поля, векторное произведение которого на нормаль площадки и определяет ток по формуле (1). Таким образом, в методе физической оптики нет необходимости решать систему линейных алгебраических уравнений большого порядка, к чему сводится большинство электродинамических методов решения системы уравнений Максвелла.

По сравнению с методом физической оптики, применение метода физической теории дифракции [2–4] позволяет учесть ещё более тонкие эффекты дифракции первичного поля облучателя на кромке зеркала. Как правило, это даёт уточнение уровня дальних боковых лепестков поля излучения антенны. Однако численная реализация метода физической теории дифракции более сложна и не универсальна и применение этого метода, с практической точки зрения, не является необходимым для анализа больших антенн.

Отметим, что при анализе зеркальных антенн метод геометрической оптики [2–4] имеет меньшую точность, чем метод физической оптики, так как в нём не учитываются поляризационные эффекты (в частности, при анализе зеркальных антенн апертурным методом). Метод геометрической теории дифракции по точности примерно эквивалентен методу физической оптики.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Для наглядности приведём решение задачи облучения параболического зеркала различного размера и сравним результаты расчёта двумя мето-

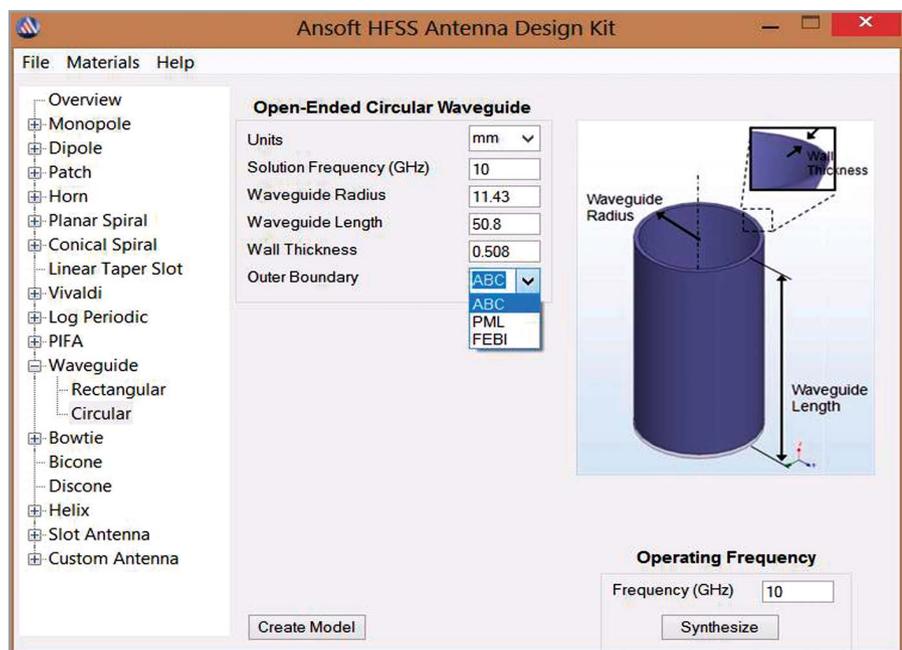


Рис. 1. Интерфейс программы ADK HFSS

дами: методом интегральных уравнений и методом физической оптики. Оба эти метода реализованы в программе HFSS ANSYS. Расчёты выполнены на одной частоте 10 ГГц. В качестве облучателя используется отрезок круглого волновода. Антенны-облучатели можно проектировать в программе ADK HFSS (см. рис. 1).

Порт устанавливается на одно сечение волновода, выполняющего роль облучателя, а другое сечение становится излучающим растром. Зеркальная антенна имеет профиль, соответствующий формуле:

$$Z = \frac{1}{4F}(x^2 + y^2), \quad (2)$$

где x , y и Z – координаты каждой точки зеркала, F – фокус параболического зеркала, в которое помещается облучатель (см. рис. 2).

Результаты расчёта осесимметричной антенны диаметром 2 м показаны на рисунках 3 и 4. На рисунке 4 показаны сечения диаграммы направленности, выполненные методом решения интегральных уравнений и методом физической оптики на одной сетке разбиения.

Из рисунка видно, что для антенн с большим диаметром методы физической оптики (ПО) и метод интегральных уравнений (IE) отличаются только уровнями боковых лепестков. В области основного лепестка эти расчёты совпадают. Для того чтобы подтвердить этот факт, впервые отмеченный в работе Е.Н. Васильева [2], выполнен ряд расчётов для зеркал с диаметром от $0,5\lambda$ до 40λ (см. таблицу 1).

Следует отметить, что при больших размерах антенн разработчик сталкивается с трудностью разбиения на сетку и длительностью расчёта. Этого можно избежать отказом от выбора размера сетки на основании частоты, исключением адаптации (процессом уплотнения сетки), а также импортом сетки проекта, который уже решался и сетка которого получена в другом примере.

Результаты расчёта для нескольких размеров осесимметричной зеркальной антенны (с отношением фокуса к диаметру $F/D=0,4$) сведены в таблице 1.

Расчёт выполнялся на персональном компьютере с 4-ядерным процессором с тактовой частотой 2 ГГц и 16 Гб

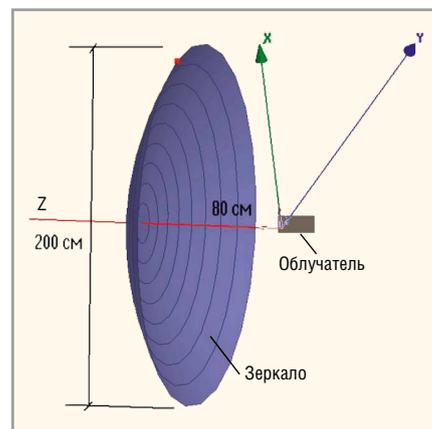


Рис. 2. Зеркальная антенна диаметром 200 см

оперативной памяти. Из таблицы видно, что время расчёта методом физической оптики до 50 раз меньше, чем при использовании метода решения интегральных уравнений. Анализ возможных ошибок при расчёте (разные значения КНД и уровня боковых лепестков) показывает, что в методе физической оптики их источником являются ошибки геометрического построения, а для метода интегральных уравнений – ошибки при расчёте системы уравнений.

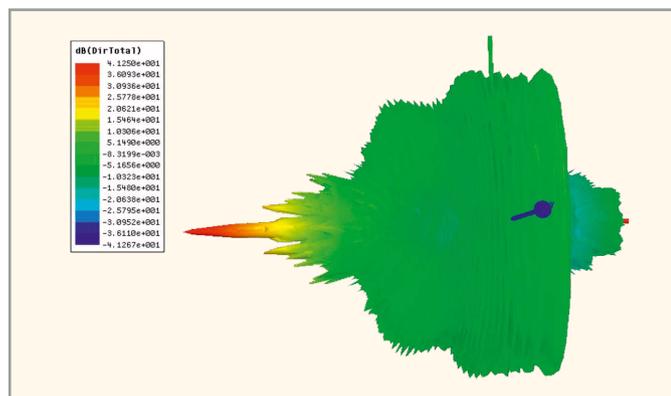


Рис. 3. 3D-диаграмма направленности осесимметричной зеркальной параболической антенны, облучаемой круглым волноводом

Метод физической оптики даёт хорошую точность для металлических моделей. Начиная с определённых размеров излучающей структуры, когда решить задачу методом моментов затруднительно из-за невозможности решения системы уравнений, логично применение метода физической оптики.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОФСЕТНОЙ АНТЕННЫ

Зеркальная антенна с осесимметричным расположением облучателя имеет тот недостаток, что облучатель и штанги затеняют лучи прямого прохождения и таким образом ухудшают КНД. Поэтому на практике часто применяется офсетная зеркальная система (см. рис. 5).

Анализируемая офсетная зеркальная антенна [1] подсвечивается снизу, под углом примерно 50°. Сечение

антенны также повернуто по отношению к вертикальной плоскости примерно на 26°.

Рабочая поверхность рефлектора является вырезкой из параболоида вращения, описываемого уравнением $Z = (x^2 + y^2)/4F$, где $F = 138$ см. Центр вырезки расположен на расстоянии 134,5 см от фокальной оси.

Антенна имеет следующие параметры [1]:

- размеры – 240 × 267 см (раскрыт Ø240 см);
- диапазон частот – 10,95...12,75 ГГц;
- ширина луча – 0,7 град;
- коэффициент усиления – 47,6 дБ (11 ГГц);
- уровень боковых лепестков – не более 25 дБ.

Следует рассчитать зеркальную офсетную антенну, облучаемую открытым концом круглого волновода. Рас-

чёт выполняется методами, реализованными в HFSS-15 [4] (см. таблицу 2).

Зеркало офсетной антенны имеет параболическую форму независимо от её диаметра. Площадь зеркала можно выбирать, изменяя диаметр цилиндра вырезки. В этом случае фокус параболического зеркала остаётся в том же месте. Оценить КНД зеркальной антенны можно по формуле:

$$\text{КНД} = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \text{КИП}, \quad (3)$$

где S – площадь зеркала, λ – длина волны (для частоты 11 ГГц $\lambda = 2,7$ см), КИП – коэффициент использования поверхности [3].

Положив, что площадь зеркала в офсетной антенне примерно равна $S = \pi D^2/4$ [3], получаем КНД = 38,9 дБ.

Метод конечных элементов (см. таблицу 2) для решения электродинамической задачи требует использования суперкомпьютера, поэтому для размеров антенны, превышающих 5λ , этот метод не применяется.

Метод интегральных уравнений IE (см. раздел 2 в таблице 2), реализованный в HFSS ANSYS IEDesign1, при решении данной задачи показал значительные ошибки (до 200%) при расчёте характеристик дальнего поля.

При этом он демонстрирует намного большую скорость расчёта, чем метод FEM. Однако большие величины ошибок доказывают, что этот метод эффективно работает только вместе с методом физической оптики (PO).

В методе FEBI (см. раздел 3 в таблице 2) задача решается в проекте HFSS HFSSDesign1 (DrivenModal), причём рупорная антенна считается методом конечных элементов FEM и охватывается боксом излучения, на который ставится условие IE. Параболическое зеркало охватывается объёмом излучения,

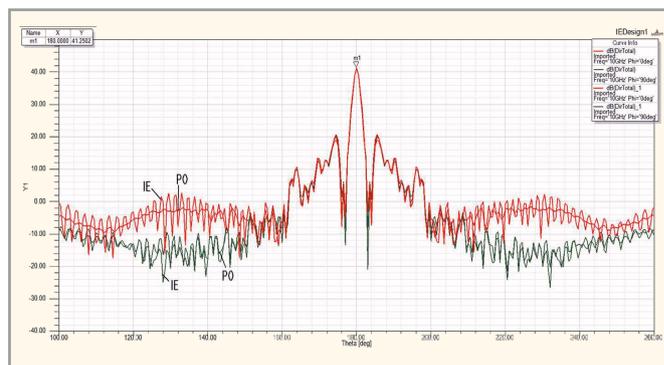


Рис. 4. Сечение ДН зеркальной осесимметричной антенны диаметром 200 см, облучаемой отрезком волновода в двух перпендикулярных плоскостях (Phi=0 и Phi=90)

Таблица 1. Результаты расчёта осесимметричной зеркальной антенны различных размеров

№ расчёта	D, см	F, см	КНД, дБ	Уровень боковых лепестков, дБ	Время расчёта	
					IE, с	PO, с
0	1,5	0,6	2,5 (PO)	-4 (PO)	20	1
			2,5 (IE)	-6 (IE)		
1	3	1,2	9,2 (PO)	-8 (PO)	20 (1000 треуг.)	1
			9,4 (IE)	-11 (IE)		
2	6	2,4	14,5 (PO)	-26,7 (PO)	24 (1500 треуг.)	1
			14,6 (IE)	-32,2 (IE)		
3	15	6	20,9 (PO)	-32 (PO)	500 (22 тыс. треуг.)	1
			22,3 (IE)	-35 (IE)		
4	30	12	28,2 (PO)	-34,2 (PO)	2100 (80 тыс. треуг.)	7
			29 (IE)	-39,2 (IE)		
5	45	18	30,5 (PO)	-25 (PO)	3300 (100 тыс. треуг.)	-
			31,6 (IE)	-30 (IE)		
6	90	36	36,94 (PO)	-37,5 (PO)	3020 (30 тыс. треуг.)	10
			37 (IE)	-42,5 (IE)		
7	200	80	41,25 (PO)	-39 (PO)	3300 (50 тыс. треуг.)	90
			41,29 (IE)	-42 (IE)		

Таблица 2. Методы решения и способы их построения

Раздел	Метод	Описание
1	Метод FEM	Метод конечных элементов. Обе части антенны (зеркальная и облучатель) находятся в одном боксе с граничными условиями Radiate
2	Метод IE	Метод интегральных уравнений. Модель содержит только зеркало, вычислительный объём не задаётся. На зеркало падает волна, эквивалентная дальнему полю облучателя
3	Метод FBIE	Каждая часть структуры охватывается отдельным боксом, внутри каждого из которых пространство считается методом FEM, а на эти боксы задаются граничные условия IE
4	Метод IE-PO	Метод физической оптики, объединённый с методом интегральных уравнений

на который также ставится условие IE. Этот гибридный метод сочетает в себе положительные стороны и метода FEM, и метода IE. Анализируемый объём, который разбивается на тетраэдры, значительно уменьшается (до 10 раз), а точность расчёта дальнего поля соответствует методу FEM.

Анализ офсетной зеркальной антенны с помощью метода физической оптики

Гибридный метод IE-PO (см. раздел 4 в таблице 2), реализованный в HFSS, позволяет заменить облучатель (см. рис. 6) сохранённым решением, полученным заранее в другом проекте. Таким образом, связанные задачи решаются последовательно. Когда получены данные по дальнему полю облучателя, рассчитывается решение для зеркала, а в качестве облучателя выступает решение, полученное ранее. Поэтому размер задачи уменьшается, что позволяет решить на ПК более сложную задачу. При этом затенение облучателем игнорируется.

Этот метод реализован в той же структуре, но с одним нюансом: в разделе Solve ставится опция PO [4]. В этом режиме от фазового центра к центру каждого треугольника зеркала прочерчивается путь, находится угол между возбуждающим сегментом и плоскостью треугольника, и по этим данным считается ток на поверхности облучаемой зеркальной антенны.

Для больших зеркальных систем можно считать, что оптимальной будет система с максимальным КНД.

Увеличить КНД моделируемой офсетной зеркальной антенны можно, если изменять положение облучателя в небольших пределах. Ещё одним способом является оптимизация разбиения поверхности зеркала. Оптимизировать разбиение можно таким образом, чтобы большие группы треугольников имели нормали, направленные в стороны облучателя зеркальной антенны. Расчёт диаграммы направленности и КНД (см. рис. 7 и 8) выполнен для частоты 11 ГГц.

Как видно из рисунка 8, уровень боковых лепестков при расчёте методом физической оптики (20 дБ) хуже, чем данные разработчика (25 дБ). С учётом анализа данных, приведённых в таблице 1, можно показать, что уровень боковых лепестков в методе PO показывает завышение уровня боковых лепестков до 5 дБ.

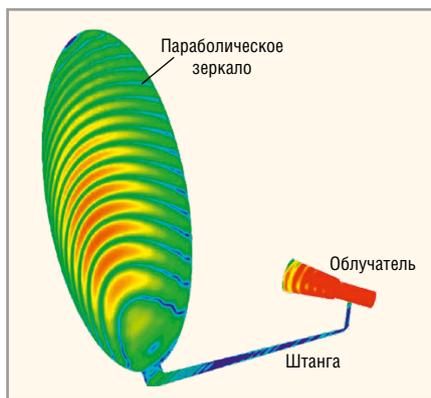


Рис. 5. Зеркальная параболическая антенна, облучаемая рупором, с рассчитанными на них токами, текущими на поверхности

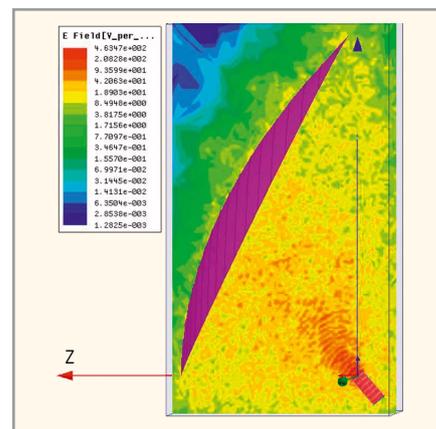


Рис. 6. Ближнее поле, облучающее параболическое зеркало офсетной антенны

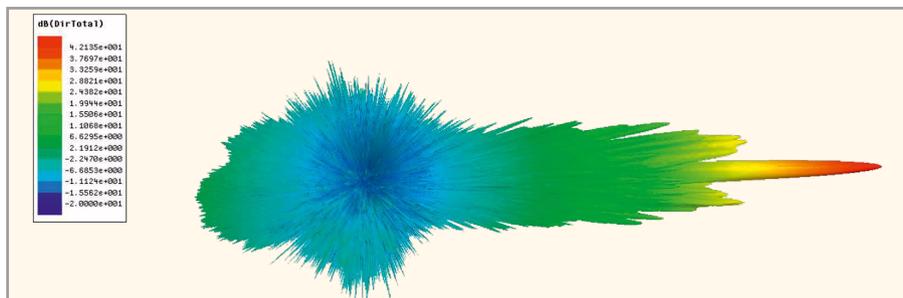


Рис. 7. Трёхмерная ДН, рассчитанная методом физической оптики

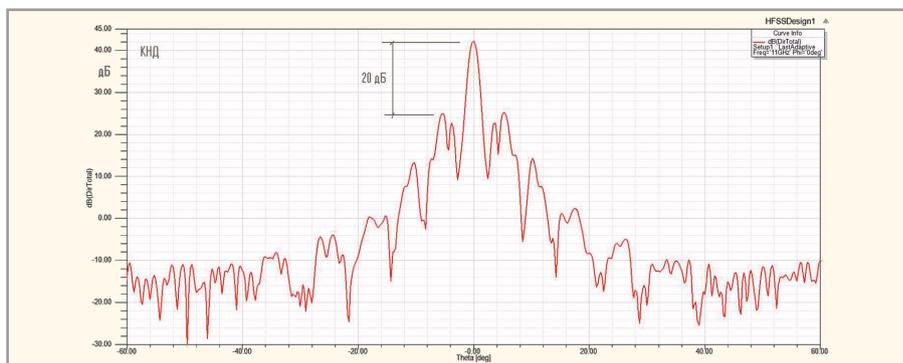


Рис. 8. Сечение ДН, решение методом физической оптики

Время расчёта ДН, показанной на рисунке 8, для указанных условий составило 8–10 минут.

Вывод

В процессе расчёта офсетных зеркальных антенн, получено совпадение результатов расчёта на программе HFSS и данных, приводимых изготовителем антенны. Программа HFSS ANSYS, как гибкий современный инструмент проектирования сложных антенных систем, имеет различные опции, которые позволяют рассчитывать задачи больших геометрических размеров. В работе показано, как одна большая задача делится на несколько меньших. Наиболее универсальный гибридный метод IE-PO позволяет рассчитать части с размером, соизмеримым с длиной волны, методом конечных элементов

или методом интегральных уравнений, а крупногабаритные части – методом физической оптики. Выполненное сравнение результатов расчёта методом интегральных уравнений и методом физической оптики показало, что начиная с размеров зеркальной антенны около 5λ метод физической оптики даёт ту же точность, что и метод интегральных уравнений, но при значительном увеличении времени счёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антенна СТВ-2,4-1.1 АУМ офсетная зеркальная производство ОАО «АлМет». г. Ульяновск. www.supral.ru.
2. Васильев Е.Н. Возбуждение тел вращения. М. «Радио и связь». 1987. 272 с.
3. Сазонов Д.М., Марков Г.Т. Антенны. 1977. М. «Энергия». 528 с.
4. www.orcada.ru.